第 37 卷第 2 期 2017 年 1 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.2 Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201507171503
娄珊宁,陈先江,侯扶江.草地农业生态系统的碳平衡分析方法.生态学报,2017,37(2):557-565.
Lou S N, Chen X J, Hou F J.Carbon balance analysis methods of grassland agro-ecosystems.Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):557-565.

草地农业生态系统的碳平衡分析方法

娄珊宁,陈先江,侯扶江*
兰州大学草地农业科技学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730020

摘要:根据草地农业生态系统的结构,它的碳平衡为 4 个生产层的碳平衡之和,也是 3 个界面的碳平衡之和,而某一生产层或者某一界面的碳平衡则是其固定、输入、排放和输出的碳之和。草地农业生态系统 4 个生产层的碳平衡分析方法定量重要生产环节的碳汇与碳源过程,便于草业生产改进碳汇管理;草地农业生态系统 3 个界面的碳平衡分析方法显示碳源和碳汇的发生机理,及其空间和数量关系,便于调控草业生产组分以增汇减排;但是,这两个方法不易区分碳的来源和去向,难以明确其利用效率。草地农业生态系统碳平衡分析的输入/输出法定量地指示碳的来源和去向,以及碳效率,计算简单,但是较为概括,不利于牧场尺度的草业碳汇管理。以中国祁连山甘肃马鹿牧场和澳大利亚塔斯玛尼亚奶牛牧场为例,用 3 种方法分析了两个牧场的碳平衡,结果表明,放牧管理的草业系统的主要碳源是休闲旅游、产品加工流通环节产生的温室气体,主要碳汇是草地和土壤中贮存的碳,好的草地管理可以增汇减排。

关键词:草地农业生态系统;生产层;界面;碳平衡;放牧;温室气体

Carbon balance analysis methods of grassland agro-ecosystems

LOU Shanning, CHEN Xianjiang, HOU Fujiang*
State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, *China*

Abstract: According to the structures of grassland agro-ecosystems, their carbon balance represent the sum of the carbon balances of the four production levels, or the sum from its three interfaces. The carbon balance per production level or interface is the sum of the carbon that is taken up and lost through the different processes in that level or interface. The carbon balance analysis method based on four production levels can quantify which of the processes in the production are either a carbon sink or source. For example, carbon and nitrogen accumulation such as Carbon and Nitrogen sink, soil and water conservation are carbon sink process in Pre-plant production level. The grassland tourism hunting and so on, are the process of carbon source in Pre-plant production level. Photosynthesis and carbon and nitrogen assimilation of biological nitrogen fixation are the process of carbon sink in Plant production level. Greenhouse gases emission is the process of carbon source in Plant production level. The process of carbon sink and source in Animal production level are mostly Carbon fixation in animal product and greenhouse gases emission of ruminant. Carbon fixation in forage and animal products are the process of carbon sink in Post-biological production level. Processing and transport activities are the process of carbon source in Post-biological production level. This can subsequently facilitate improvements in the management of carbon sequestration in grassland production. Furthermore, the carbon balance analysis method based on three interfaces can determine the production mechanisms of carbon sinks and sources, as well as their spatial and quantitative relationships. This can contribute to regulating and controlling the carbon emissions from grassland agro-ecosystems. However, both methods cannot accurately quantify a grassland system's paths of carbon uptake and output, or its utilization efficiency. The carbon balance

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB138706);国家自然科学基金资助项目(31172249);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT13019);国家科技支撑计划课题资助项目(2011BAD17B0203)

收稿日期:2015-07-17; **网络出版日期**:2016-06-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: cyhoufj@ lzu.edu.cn

analysis by the balance between carbon input and output can quantify the pathway of carbon movement. This method is simple and more succinct; however, it is not applicable to farmland scale management of carbon sequestration. Considering a ranch in the Qilian Mountains, China, and a dairy farm in Tasmania, Australia, as examples, three methods were used for analyzing their carbon balances. The results showed that carbon emissions from tourism, product processing, and marketing accounted for the major portions of the total emissions from the grazing management system. Their main carbon sinks were carbon stored in the forage and the soil. Overall, optimal grassland management would benefit from adding carbon sinks and reducing carbon emissions.

Key Words: grassland agro-ecosystems; production level; interface; carbon balance; grazing; greenhouse gases

草地是全球面积最大的陆地生态系统,全世界天然草地有机碳储量 7610—10730 亿 t[1-2],占陆地碳储量的 37.1%—52.3%[3]。在一定时间尺度上,草地为碳中性,年际间波动较小[4]。过去 20 年,中国草地生物量和土壤有机碳库没有显著变化[5-6],处于中性碳汇状态[7];期间,它输出的旅游产品、文化产品和草畜产品却逐年增多[8-9];如果把这部分碳损失计算在内,草地本质上是一个碳汇。草地碳库受管理的影响较大[10-11],碳源或碳汇取决于放牧管理水平[12-13],一般放牧系统的温室气体(Greenhouse gases,GHG)排放低于同等畜群规模的舍饲系统[14]。放牧系统能够数十年(如英国和新西兰的栽培草地)乃至上千年(如天然草地)持续输出畜产品,草畜耦合可以提升这种能力[15]。

草业碳汇管理以碳测定技术为基础。以往较为关注土壤和家畜 GHG 排放测定,多以某一组分为对象,而非生态系统整体[16]。土壤 GHG 的测定有间接测定法和直接测定法[17]。间接法通过测定土壤 ATP 含量等相关因子,建立其与土壤 GHG 排放的数量预测模型[18],适用于大尺度或跨区域的土壤呼吸预测,以及直接测定土壤呼吸困难或成本较高的领域。直接测定法常用静态气室法(Static Chamber Method)、动态气室法和微气象技术、室内测定法等,测定容器内 GHG 浓度的变化来计算其通量[17],与成分综合法、底物诱导呼吸法、同位素稀释法、^{13}C 自然丰度法、脉冲标记法等结合能测定土壤 GHG 的来源,进而定量根呼吸和土壤微生物呼吸[19]。家畜 GHG 排放主要是 CH_4 和 N_2O,放牧家畜呼出的 CO_2 被认为是对草地光合作用的平衡而不计测,CH_4 主要通过肠道发酵排放,N_2O 主要由排泄物排放[20]。家畜 GHG 排放的测定包括呼吸代谢室(箱)、呼吸面罩和呼吸面具、微气象技术、隧道技术、激光技术、模型法、体外模拟法,其中排泄物 GHG 测定基本同土壤。呼吸室法将家畜置于舱室,根据室内 GHG 变化,计算家畜 GHG 排放量,有密闭式、开闭式和开放式 3 种[20]。呼吸面罩常与六氟化硫(SF_6)等指示物结合,在家畜鼻孔处采集气体样品,不限制家畜活动,适用于放牧试验。微气象技术、激光技术、隧道技术可测定放牧畜群的 GHG 的排放量[20-22]。大中尺度家畜 GHG 排放多根据 IPCC 的参数和统计数据计算[23]。

草地农业生态系统(草业系统)以草地资源为基础,在生物因素、环境因素和人类社会管理因素的共同作用下发生与发展,其中土-草-畜-人是碳流通的主干,它具有前植物(Pre-plant production level, PPP)、植物(Plant production level, PP)、动物(Animal production level, AP)和后生物(Post-biotic production level, PBP)4 个生产层,以及草丛-地境(Interface between herbage and site, HIS; interface A, IA)、草地-家畜(Interface between grassland and livestock, IGL; interface B, IB)、草畜系统-社会经营管理(Interface between grassland-livestock system and social and economic management, IGLSE; interface C, IC)3 个界面[24]。它的碳循环从 CO_2 同化开始,到碳排放和人类享用各类产品结束,其碳平衡机制取决于草地利用方式及管理水平,系统的核心驱动力是草-畜互作,动物生产是源、汇转换的重要阀门[10]。目前,草地碳循环的研究较多,特别是草地植被、土壤有机碳,对家畜生产及其与草原碳汇的关系、草畜产品加工、流通等过程碳平衡的报道较少。

当前,草业系统碳汇的研究结果差异较大[25-28],生产管理对碳动态的影响及其机制尚不明确,限制了人类对草业碳汇过程的理解和管理,主要因为估算方法不统一及其导致的统计数据差异[25-26],根本原因是缺乏

以草业系统结构和关键生态过程为基础的评估方法。为此,本研究拟从草业系统 4 个生产层(结构)、3 个界面(关键生态过程)和系统整体,重视家畜和草畜互作,建立简单、适用、准确的草业系统碳平衡分析方法。

文中,草地农业生态系统的碳平衡(Carbon balance of grassland agro-ecosystem, CBGAE)指一定时间内碳贮量的变化,主要指碳,兼顾氮,因为 N_2O 是草业系统重要的 GHG。计量单位为所含的碳量或相当的碳当量。

1　草地农业生态系统 4 个生产层的碳流动

草业系统的碳沿着前植物、植物、动物、后生物 4 个生产层运动(图 1)。

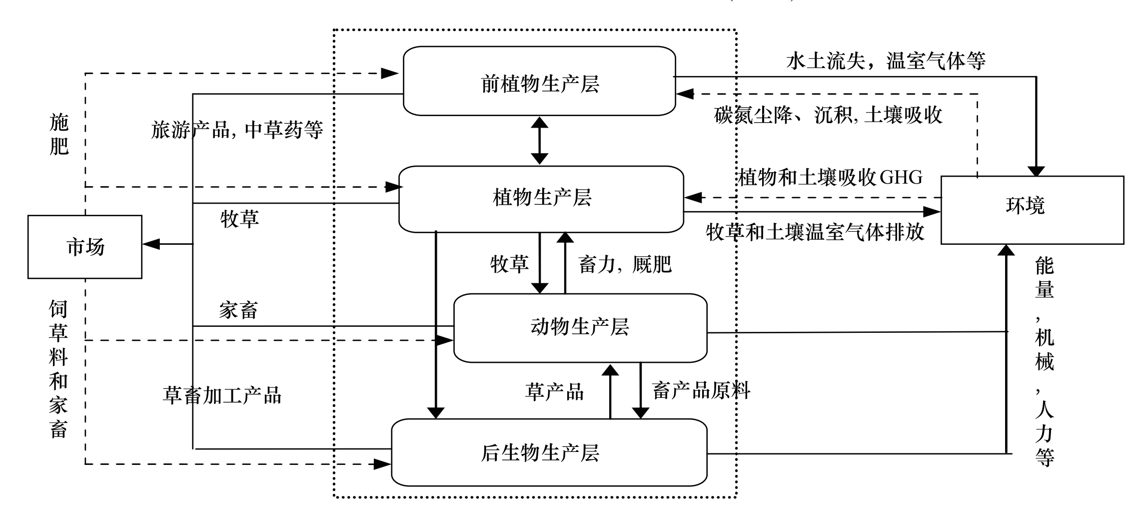


图 1　草地农业生态系统 4 个生产层的碳流

Fig.1　Carbon flow of grassland agro-ecosystem based on four production levels

实线表示碳在 4 个生产层内流动或者由生产层流动至外界,虚线表示外界将碳输送至 4 个生产层中

1.1　前植物生产层的碳平衡

前植物生产层以水土保持、休闲娱乐、狩猎旅游等景观生产为主[29]。尘降、水土保持、生物固氮等活动积累碳氮,是碳汇过程。草地旅游、狩猎等景观、休闲产品是碳源过程,包括生产层管理的能源消耗、草地践踏等引起的碳排放(图 1)。该生产层的 GHG 排放研究虽少,但是草业观光旅游的碳排放已受到关注[30]。尘降是碳汇,但短期内贡献较小。

前植物生产层的碳平衡 CBPPP(carbon balance of PPP) = $C_{input} - C_{output}$。C_{input} 为碳输入,包括碳氮尘降和土壤沉积、生物固氮及施肥、补播等碳输入。C_{output} 为碳输出,主要包括人和草地以及机械、灌溉等管理活动的 GHG 排放。CBPPP>0,生产层为碳汇;CBPPP=0,生产层为碳中性,处于生态临界点,面临退化风险;CBPPP<0,生产层为碳源,处于退化阶段[10]。提高单位碳排放的经济效益是该生产层增碳减排的主要方向。

1.2　植物生产层的碳平衡

植物生产层是传统意义上天然草地和栽培草地的牧草生产,是草业系统的主要碳库,包括植物碳库和土壤碳库。碳汇过程主要是光合作用和生物固氮的碳氮同化,以及施肥、补播等碳输入。碳源主要是土、草和生产层管理中人力、机械、能量消耗等 GHG 排放,以及牧草输出等(图 1)。

植物生产层的碳平衡 CBPP(carbon balance of PP) = $C_{input} - C_{output}$。一般,CBPP>0,尤其是天然草地。CBPP=0,表明天然草地面临退化风险,栽培草地需要水、肥、能量等投入以维持运转因而属正常。CBPP<0,草地碳贮量正在减少,处于退化状态[13,31]。提高牧草产量和质量、减少土壤碳排放和管理的投入是该生产层的主要增汇减排途径。

1.3　动物生产层的碳平衡

动物生产层是传统意义上的食草家畜饲养,是草业系统的主要碳源之一。植物生产层的植物碳,绝大部分通过家畜肠道发酵、排泄物挥发和分解而排放到环境(图 1)。畜群管理中人力、机械、疫病防控等排放

GHG,是另一主要碳源。家畜生产因购入饲草料而输入碳。家畜排泄物除了淋溶、GHG 排放,大部分碳氮返还到草地,成为土壤碳。极少部分牧草碳固定在畜产品中,而且家畜骨骼、皮毛、角蹄中的碳易于长期保存,也是碳库。畜肉血中的碳很快排放,排放量可根据屠宰率计算。

动物生产层的碳平衡 CBAP(carbon balance of AP)= $C_{input}-C_{output}$。C_{input} 主要是牧草。家畜对牧草转化效率远小于 1,故 CBAP<0。提高牧草尤其是 N 的转化效率、促进排泄物循环利用是该生产层增碳减排的主要途径。

1.4 后生物生产层的碳平衡

后生物生产层主要是草畜产品加工、贮运以及整个草业系统管理,能够大幅提升草业生产的社会效益和经济效益[32]。同时,需要投入大量能量和物质。碳源包括产品加工、贮运等,及其基础设施和设备制造的碳排放。牧草和家畜作为加工原料输入该生产层,部分草畜产品可长久保存,为碳汇。

后生物生产层的碳平衡 CBPBP(carbon balance of PBP)= $C_{input}-C_{output}$。因生产层运转所排放的碳远多于输入的碳,CBAP<0。草业系统如果以经济效益为主要目标,兼顾食物生产,可以通过该生产层提升单位碳排放的经济效益,或可总体上减少 GHG 排放;如果以获取食物为主要目标,兼顾经济效益,应该控制草畜产品加工、贮运的碳排放;可见,该生产层的管理有助于草业系统整体的增汇减排。

1.5 系统碳平衡与案例分析

草地农业生态系统的碳平衡是 4 个生产层碳平衡之和,CBGAE=CBPPP+CBPP+CBAP+CBPBP。在某一生产周期,CBGAE>0,草业系统为碳汇,反之则为碳源。它的碳效益为碳固定量与经济效益的比,值越大,说明生态系统的物质和能量转化效率越高,环境负债率越低,生态和经济可持续性越强。结合各生产层的碳平衡分析,可以针对性地改进碳管理。

CBGAE 的测算可以基于某一农牧场或某一企业、某一生产区域、生态区域或行政区域,故以我国祁连山中段的甘肃马鹿牧场和澳大利亚塔斯玛尼亚西北部的奶牛牧场为例(表 1)[15,31-39]。

祁连山牧场的甘肃马鹿(*Cervus elaphus kansuensis* Pocock)冬季和春秋季主要在高寒草原放牧,夏季主要在高寒灌丛草甸放牧[40-41],并且发展了高山牧场旅游、中草药和马鹿茸、血产品加工[33]。塔斯玛尼亚牧场的奶牛常年在多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)栽培草地放牧,发展了农业观光和奶酪加工[38]。这两个系统均有相对完整的 4 个生产层,体现了世界农业系统多功能性增强的演化趋势[15]。

表 1 祁连山牧场马鹿牧场(DRQ)和塔斯马尼亚奶牛牧场(DRT)4 个生产层的碳平衡

Table 1 Carbon balance analysis of four production levels from the deer ranch in Qilian Mountain (DRQ) and dairy ranch in Tasmania (DRT)

生产层 Production level	主要碳源(1) Main carbon source/(t C/a)			主要碳汇 Main carbon sink/(t C/a)			平移碳平衡 Carbon balance/(t C/a)	
	项目 Items	DRQ	DRT	项目 Items	DRQ	DRT	DRQ	DRT
前植物生产层	旅游人数/(人次/a)	5000	6000	碳尘降,水土保持/(t/a)			−36000.0	−103809.8
Pre-plant production level	淋溶/(g m^{-1} a^{-1})	0	0.7					
	人均碳排放/(t/a)	7.2	17.3					
植物生产层 Plant production level	草地面积/hm^2	1020	1400	SOC 积累/(t/m^2)	0.122	0.122	1243298.4	167580.0
动物生产层 Animal production level	土壤 GHG 排放/(kg hm^{-2} a^{-1})	1080	2300	日采食量/(kg 头$^{-1}$ d^{-1})	3.15	20	−15.8	−173.3
	家畜数量/头	1000	2100	消化率/%	57	70		
	粪便发酵系数/(kg 头$^{-1}$ d^{-1})	0.22	29	年排粪量/(kg 头$^{-1}$ d^{-1})	526	5840		
后生物生产层	肠道发酵系数/(kg 头$^{-1}$ d^{-1})	20	81	屠宰率/%	50.72	49.00	−1005.2	−2475.8
Post-biological	燃煤量/(t/a)	10	8					
production level	燃油的消耗量/(t/a)	10	15					
	劳动力/(人/a)	10	10					
		CBGAE(2)					1206277.4	61121.2

DRQ:祁连山牧场马鹿牧场 Deer ranch in Qilian Mountain;DRT:塔斯马尼亚奶牛牧场 Dairy ranch in Tasmania;CBGAE:草地农业生态系统碳平衡 Carbon balance of grassland ago-ecosystem

祁连山牧场 CBGAE>0,为碳汇。碳输出中,前植物、动物和后生物 3 个生产层分别占 97.2%、0.04%和 2.7%(表 1)。动物生产层中,43%的 C 随排泄物返还草地,57%排放到环境中。后生物生产层的碳排放主要来自茸、血加工。马鹿的消化率低导致更多的 GHG 排放,除了食性外[33],主要因为冬季牧场牧草粗老而且利用时间长,夏季和秋季放牧也不在牧草幼嫩期[40]。

塔斯马尼亚牧场 CBGAE>0,也为碳汇。植物生产层因为施肥、灌溉等,碳排放多于祁连山牧场(表 1)。由于划区轮牧,奶牛总是在牧草适宜期采食,因而消化率高。两个牧场后生物生产层的碳源占比低于 3%。

2　草地农业生态系统 3 个界面的碳平衡分析

草业系统的 3 个界面是碳固定或排放的活跃区域和通道(图 2)。

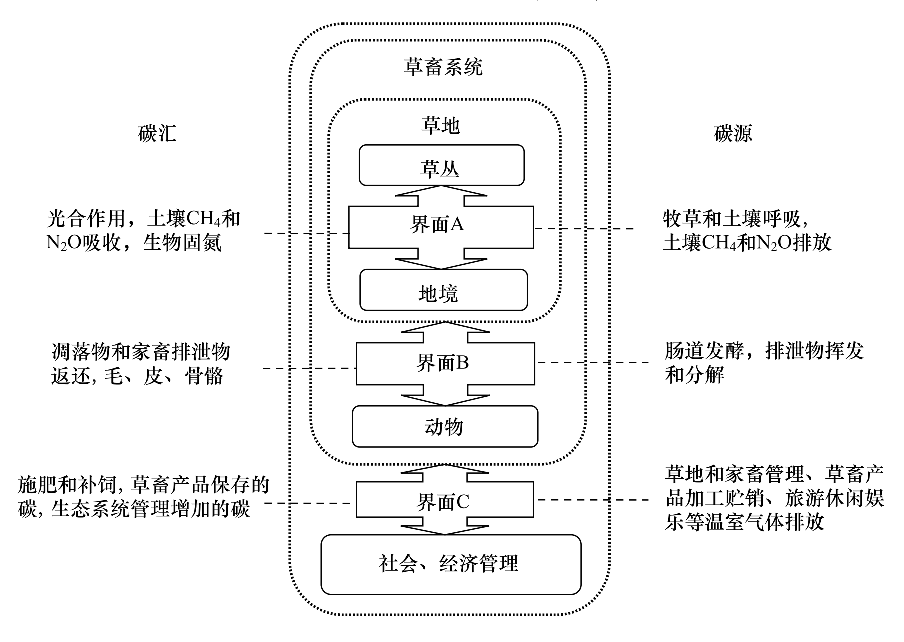


图 2　草地农业生态系统 3 个界面的碳流

Fig.2　Carbon flow of grassland agro-ecosystem based on three interfaces

界面 A 过程形成草地[42],它是草类植物与非生物环境之间碳交换的区域(图 2)。其碳平衡(Carbon balance of IHS,CBIHS,CBIA) CBIA = $C_{input}-C_{output}$。C_{input} 主要是光合作用、牧草碳氮吸收、大气碳氮尘降、生物固氮等碳输入。C_{output} 包括牧草和土壤 GHG 排放,GHG 主要是 CO_2,CH_4 和 N_2O 较少。一般,CBIA>0,该界面是碳汇过程;但是,退化草地的碳等物质及其所含能量入不敷出[43],CBIA≤0。

界面 B 过程形成草畜系统,它是草地与家畜相互作用的区域(图 2)。该界面的碳平衡(Carbon balance of IGL,CBIGL,CBIB) CBIB = $C_{input}-C_{output}$。$C_{out\ put}$ 主要是家畜肠道发酵、排泄物的挥发和分解,GHG 以 CH_4 和 N_2O 为主。C_{input} 主要是凋落物和家畜排泄物返还到草地,毛、皮、骨骼的碳保存。一般,家畜采食的牧草超过 20%、甚至 50%作为排泄物返还草地,其中一部分挥发、淋溶,或分解中损失,故 CBIB<0 或 CBIB≈0,界面 B 是碳源。

界面 C 过程进化完整地草地农业生态系统[42],它的碳平衡(Carbon balance of IGLSE,CBIGLSS,CBIC) CBIC = $C_{input}-C_{output}$。$C_{out\ put}$ 包括草地管理、畜群管理,以及草畜产品加工和贮运、旅游和狩猎等过程的碳排放。C_{input} 主要是固定在草畜产品的碳,以及草业系统管理、保护和恢复所增加的碳。其碳平衡较为复杂:管理得当,CBIC>0;管理不当,碳排放加速,CBIC<0。

草业系统的碳平衡是 3 个界面碳平衡的和,CBGAE = CBIA+CBIB+CBIC,可以据此有针对性地加强某一界面的碳管理。仍以祁连山马鹿牧场和塔斯玛尼亚奶牛牧场为例(表 2)。

表 2 祁连山牧场和塔斯马尼亚牧场 3 个界面的碳平衡

Table 2 Carbon carbon balance of three interface from the deer ranch in Qilian Mountain and dairy ranch in Tasmania

3 个界面 Three interfaces	主要碳源 Carbon source/(t C/a)	主要碳汇 Carbon sink/(t C/a)	碳平衡 Carbon balance/(t C/a)	
			DRQ	DRT
草丛-地境界面 Herbage-site interface	牧草和土壤 GHG 排放、淋溶	光合作用,土壤 CH_4 和 N_2O 吸收,生物固氮	1243298.4	167570.2
草地-家畜界面 Grassland-livestock interface	肠道发酵,排泄物挥发和分解	凋落物和家畜排泄物返还,毛、皮骨骼的保存	-15.8	-173.3
草畜系统-社会经营管理界面 Grassland and livetock system-social and economic management interface	草地和家畜管理,草畜产品加工贮销、旅游休闲娱乐等 GHG 排放	施肥和补饲,草畜产品保存的碳,草业系统管理增加的碳	-37005.2	-106275.8
	CBGAE		1206277.4	61121.2

两个牧场系统的 CBGAE>0,均为碳汇。

草业系统的碳排放主要发生在前植物生产层或界面 C,碳汇主要在植物生产层或界面 A,在两个牧场中均超过 90%(表 1 和表 2)。因此,碳汇管理应减少前植物和后生物生产层的碳排放,增加植物和动物生产层的碳汇;或是增加界面 A 和 B 的碳汇,减少界面 C 的碳排放。

3 草地农业生态系统碳平衡分析的输入/输出法

草业系统某一生产层或界面的碳平衡可以根据四个部分确定。输入(Carbon input,*CI*),从草业系统外部输入的化肥、机械、种子、畜力、厩肥等物质,光合作用吸收、同化 CO_2,微生物活动固定的 CH_4 和 N,尘降和水土保持积累碳氮。排放(Carbon emission,*CE*),人类、家畜消费草畜产品,包括食物、能源、畜力、日用品、厩肥等,在一定时间内还原为 GHG。固定部分(Carbon fixation,*CF*),牧草、家畜、排泄物等,在一定时间内以可贮存的形态存在于草业系统内。输出(Carbon output,*CO*),输出的草畜产品、种子、畜力、厩肥等。

草业系统的碳平衡为 CBGAE = $CI+CF-CE-CO$。如果 CBGAE>0,即 $CI+CF>CE+CO$,草业系统为碳汇,反之为碳源。某一生产层或某一界面的碳平衡同理计算,它们的初始碳量与碳平衡之和为当前碳量。

表 3 动物生产层碳平衡分析的输入/输出法举例

Table 3 A case study of carbon balance analysis of animal production level based input/output method

功能部 Section	项目 Items	碳平衡量 Carbon balance/(t C/a)	
		DRQ	DRT
输入 Carbon input	机械、牧草	0	0
排放 Carbon emission	管理消耗的食物和能源	-15	-127.575
固定 Carbon fixation	牧场内的畜产品和厩肥	0	0
输出 Carbon output	出售的畜产品和厩肥	-0.8	-45.68
	CBGAE	-15.8	-173.3

祁连山和塔斯玛尼亚两个草业系统的动物生产层均为碳源(表 3),与生产层法和界面法的分析结果相同(表 1,表 2)。

4 讨论

4.1 3 种碳平衡计算方法的比较

3 种草业系统碳平衡分析方法各有侧重(表 4):4 个生产层的方法关注能量与物质流动规律,对应着相应的生产环节;界面的方法强调关键生态过程,简明地体现了碳平衡的作用机制;碳输入/输出法侧重碳相对于生态系统的运动,忽略碳产生的环节和机制。目前碳平衡分析常用方法还有生活史分析(Life cycle analysis)[30,44-46]和元分析(Meta-analysis)[11,47-49];前者对碳流程自上而下梳理,与生产层法和界面法有相似之

处,但是它忽略生产环节或系统组分之间的联系和相互作用;后者对已有文献的实测指标再一次的统计分析,相对定量地、概括地反映大时空尺度的碳动态,但是对碳平衡的机理难以作具体的、有针对性的明晰。

表 4　草地农业生态系统碳汇计算方法的比较

Table 4　Comparison among analysis methods of carbon sink in grassland

计算方法 Methods	优点 Advantage	有待改进的地方 Disadvantage
生产层 Production level	关注能量物质流动,与生产环节对应,尺度适中,有利于改进生产管理	需调查数据支持
界面 Interface	碳平衡机理清楚,有助于理解	需注意细节
输入-输出法 Input-Output	生态系统角度,计算简单,来去明晰	计算项目繁多,与发生过程与机理联系不紧密
生活史分析 Life cycle analysis	概括,去向明晰	不明具体环节间的联系和要素间的相互作用
元分析 Meta-analysis	反映大时空尺度碳动态	受现有研究结果限制,难以阐明机理和能流方向

草业系统碳汇,既有光合作用、碳尘降等自然过程,也有施厩肥等人工碳。当前的碳平衡分析方法难以区别碳的这两种来源,也难以定量输出碳的来源,不利于提高碳的管理效率,是今后研究需要改进的方面。

4.2　影响碳平衡分析的因素

4.2.1　大气碳氮尘降

每年有 36 亿 t 碳尘降,近 10 亿 t 不知去向[50],90%返还到土壤或水体,对湿润地区生态系统碳平衡有重要影响。文中案例分析未考虑碳氮尘降,其生态效应却是当前研究热点之一,短期内氮尘降提高植物生产力,增加土壤微生物对有机质的分解[51],直接影响植物碳库和土壤碳库[51];长期则降低土壤微生物量[52]。

4.2.2　草地碳氮淋溶

草业系统的可溶性碳氮会淋溶到地下水系统[53-54]。碳氮淋溶的影响因素主要是降水、灌溉和土地利用方式[38,53,55-57]。天然草地因主要位于干旱和极端干旱地区,只存在微弱的淋溶过程[58];因而保持大量无机碳,其碳量超过土壤有机碳[2]。草地灌溉量越多,土壤无机碳的淋溶量越大[58]。放牧会增强土壤的淋溶作用,一方面因为放牧降低植被盖度,加快土表枯落物分解,减少了降水截留[55];另一方面放牧促进植物地上部分产物向根系分配运输,加快土壤有机质分解,促进分解产物向下部转移和聚集[59]。此外,土壤中空气 CO_2 分压和土壤溶液的 pH 值也控制土壤无机碳浓度和通量[38],影响草业系统的碳平衡[60]。

4.2.3　家畜排泄物的 GHG 排放

集约化草业系统中家畜排泄物的 GHG 排放不容忽视。IPCC 的 GHG 排放目录中,家畜粪便的 CH_4 排放是重要指标[35]。放牧家畜的排泄物多返还草地,少部分归牧后存留于畜圈[10],这部分碳发酵后施肥到耕地中;排泄物的 GHG 排放多发生于存储、堆沤过程,进入土壤的碳还影响土壤微生物呼吸和碳储量。但是,放牧家畜或者厩肥有多少排泄物碳返还到土壤、多少成为土壤碳,尚不清楚。

4.2.4　后生物生产层的碳足迹

国际碳足迹核算多用在能源行业[61],尚没有草业系统通用的碳足迹计算标准,而且后生物生产层的碳足迹仍是研究空白,用生命周期评价法(Life cycle assessment, LCA)可对其各个组分梳理,明确其耗能排放数据[62]。我国天然草地面积大,栽培草地方兴未艾,草畜产品加工是草业发展的关键,却与增碳减排相矛盾,草业系统发展后生物生产层以提高系统整体碳排放的经济效率是兼顾生态与生产的重要途径,实施清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)对于草地农业生态系统后生物生产层的健康发展有借鉴意义[63-64]。

参考文献(References):

[1] 蒋延玲, 周广胜. 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究. 应用生态学报, 2001, 12(4): 481-484.

[2] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 韩彬, 胡中民, 岳燕珍, 梁飚. 草地生态系统碳循环研究进展. 草地学报, 2005, 13(Z1): 67-73.

[3] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.

[4] Hou F J. Adaptation of mixed crop-livestock systems in Asia//Fuhrer J, Gregory P, eds. Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural

Systems: Soil Ecosystem Management in Sustainable Agriculture. UK: CAB International, 2014: 155-166.
[5] Yang Y H, Fang J Y, Smith P, Tang Y N, Chen A P, Ji C J, Hu H F, Rao S, Tan K, He J S. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. Global Change Biology, 2009, 15(11): 2723-2729.
[6] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Smith P, Mohammat A, Wang S P, Wang W. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s. Global Change Biology, 2010, 16(11): 3036-3047.
[7] 方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
[8] 王春梅, 杨林杰, 常生华, 侯扶江. 国内外主要畜产品与饲料价格分析. 草业学报, 2014, 23(1): 300-311.
[9] 张重丽, 于应文, 付强国, 孙义, 侯扶江. 我国畜产品生产与贸易. 草业学报, 2015, 24(7): 163-171.
[10] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用. 生态学报, 2006, 26(1): 244-264.
[11] McSherry M E, Ritchie M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. Global Change Biology, 2013, 19(5): 1347-1357.
[12] Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1235-1241.
[13] Hou F J, Nan Z B, Xie Y Z, Li X L, Lin H L, Ren J Z. Integrated crop-livestock production systems in China. The Rangeland Journal, 2008, 30(2): 221-231.
[14] Casey J W, Holden N M. Quantification of GHG emissions from sucker-beef production in Ireland. Agricultural Systems, 2006, 90(1/3): 79-98.
[15] 侯扶江, 南志标, 任继周. 作物-家畜综合生产系统. 草业学报, 2009, 18(5): 211-234.
[16] Chen J B, Hou F J, Chen X J, Wan X L, Millner J. Stocking rate and grazing season modify soil respiration on the Loess Plateau, China. Rangeland Ecology & Management. 2015, 68(1): 48-53.
[17] 崔骁勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展. 生态学报, 2001, 21(2): 315-325.
[18] Schlentner R E, Van Cleve K. Relationships between CO2 evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. Canadian Journal of Forest Research, 1985, 15(1): 97-106.
[19] Panikov N S, Paleeva M V, Dedysh S N, Dorofeev A G. Kinetic methods of determining the biomass and activity of different groups of soil microorganisms. Pochvovedenie, 1991, (8): 109-120.
[20] 赵一广, 刁其玉, 邓凯东, 刘洁, 姜成钢, 屠焰. 反刍动物甲烷排放的测定及调控技术研究进展. 动物营养学报, 2011, 23(5): 726-734.
[21] 应洪仓, 黄丹丹, 汪开英. 畜牧业温室气体检测方法与技术. 中国畜牧杂志, 2011, 47(10): 56-59, 63-63.
[22] 王成杰, 汪诗平, 周禾. 放牧家畜甲烷气体排放量测定方法研究进展. 草业学报, 2006, 15(1): 113-116.
[23] Canadell P, Raupach M. Global carbon report: emissions will hit new heights in 2014. ECOS, 2014.
[24] 任继周, 李向林, 侯扶江. 草地农业生态学研究进展与趋势. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1017-1021.
[25] Fan J W, Zhong H P, Harris W, Yu G R, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above-and below-ground biomass. Climatic Change, 2008, 86(3/4): 375-396.
[26] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(9): 1341-1350.
[27] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205-218.
[28] 任继周, 林慧龙. 草地土壤有机碳储量模拟技术研究. 草业学报, 2013, 22(6): 280-294.
[29] 赵雪. 草地旅游在草地生态系统中的作用及其持续发展. 中国草地, 2000, (5): 68-73.
[30] 唐承财, 钟林生, 成升魁. 旅游业碳排放研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(4): 451-460.
[31] 侯扶江, 安玉峰. 祁连山高寒牧区甘肃马鹿产茸量的分析. 中国农业科学, 2002, 35(10): 1269-1274.
[32] 侯扶江, 李广, 杨逢刚. 甘肃马鹿夏冬季在祁连山高山草地的放牧行为. 生态学报. 2003, 23(9): 1807-1815.
[33] 任继周, 林惠龙, 侯向阳. 发展草地农业 确保中国食物安全. 中国农业科学, 2007, 40(3): 614-621.
[34] 向志民, 何敏. 厩肥资源质量分析与评价. 陕西农业科学, 2000, (5): 14-16.
[35] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press. 2013-09-30[2014-07-17]. http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Uq-tD7KBRR1.
[36] 钱文熙, 敖维平, 玉苏普. 塔里木马鹿采食量与消化率研究. 中国草食动物科学, 2014, 34(2): 31-32, 38-38.
[37] 任继周, 朱兴运, 王钦, 贾笃敬, 徐长林, 汪玺, 戈棠. 高山草原草地有效生产能力(P4)以前诸转化阶生产能力动态的研究. 生态学杂志, 1982, (2): 1-8.
[38] Kindler R, Siemens J, Kaiser K, Walmsley D C, Bernhofer C, Buchmann N, Cellier P, Eugster W, Gleixner G, Grünwald T, Heim A, Ibrom A, Jones S K, Jones M, Klumpp K, Kutsch W, Larsen K S, Lehuger S, Loubet B, Mckenzie R, Moors E, Osborne B, Pilegaard K, Rebmann C, Saunders M, Schmidt M W I, Schrumpf M, Seyfferth J, Skiba U, Soussana J F, Sutton M A, Tefs C, Vowinckel B, Zeeman M J, Kaupenjohann M. Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance. Global Change Biology, 2011, 17(2):

1167-1185.

[39] Parfitt R L, Percival H J, Dahlgren R A, Hill L F. Soil and solution chemistry under pasture and radiata pine in New Zealand. Plant and Soil, 1997, 191(2): 279-290.

[40] Yuan H, Hou F J. Grazing intensity and soil depth effects on soil properties in alpine meadow pastures of Qilian Mountain in northwest China. Acta Agriculturae Scandinavica, 2015, 65(3): 222-232.

[41] Zhang Y, Chen X J, Cheng Y X, Chang S H, Hou F J. Effects of stocking rates on functional group diversity and forage quality in rangeland of Qilian Mountain, China. Journal of Environmental Biology, 2015, 36(Special issue): 713-719.

[42] Day G S. The product life cycle: analysis and applications issues. Journal of Marketing, 1981, 45(4): 60-67.

[43] 侯扶江, 南志标, 肖金玉, 常生华. 重牧退化草地的植被、土壤及其耦合特征. 应用生态学报, 2002, 13(8): 915-922.

[44] Helin T, Sokka L, Soimakallio S, Pingoud K, Pajula T. Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment: a review. GCB Bioenergy, 2013, 5(5): 475-486.

[45] Perez-Garcia J, Lippke B, Comnick J, Manriquez C. An assessment of carbon pools, storage, and wood products market substitution using life-cycle analysis results. Wood and Fiber Science, 2005, 37(Special Issue): 140-148.

[46] Weber C L, Clavin C. Life cycle carbon footprint of shale gas: Review of evidence and implications. Environmental Science & Technology, 2012, 46(11): 5688-5695.

[47] Maillard É, Angers D A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis. Global Change Biology, 2014, 20(2): 666-679.

[48] Bárcena T G, Kiær L P, Vesterdal L, Stefánsdóttir H M, Gundersen P, Sigurdsson B D. Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: a meta-analysis. Global Change Biology, 2014, 20(8): 2393-2405.

[49] Mueller K E, Hobbie S E, Tilman D, Reich P B. Effects of plant diversity, N fertilization, and elevated carbon dioxide on grassland soil N cycling in a long-term experiment. Global Change Biology, 2013, 19(4): 1249-1261.

[50] 刘再华. 大气 CO2 两个重要的汇. 科学通报, 2000, 45(21): 2348-2351.

[51] 肖胜生, 董云社, 齐玉春, 彭琴, 何亚婷, 杨智杰. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展. 地球科学进展, 2009, 24(10): 1138-1148.

[52] Gloser J, Tesarova M. Litter, soil, and root respiration measurement: An improved compartmental analysis method. Pedobiologia, 1978, 18: 76-81.

[53] Ciais P, Borges A V, Abril G, Meybeck M, Folberth G, Hauglustaine D, Janssens I A. The impact of lateral carbon fluxes on the European carbon balance. Biogeosciences, 2008, 5(5): 1259-1271.

[54] Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, Smith P, Nabuurs G J, Folberth G, Schlamadinger B, Hutjes R W A, Ceulemans R, Schulze E D, Valentini R, Johannes Dolman A. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO2 emissions. Science, 2003, 300(5625): 1538-1542.

[55] 陆晴, 王玉刚, 李彦, 唐立松. 干旱区不同土壤和作物灌溉量的无机碳淋溶特征实验研究. 干旱区地理, 2013, 36(3): 450-456.

[56] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤氮素淋溶的影响. 水土保持研究, 2009, 16(3): 114-116.

[57] Schulze E D, Luyssaert S, Ciais P, Freibauer A, Janssens I A. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. Nature Geoscience, 2009, 2(12): 842-850.

[58] 樊恒文, 贾晓红, 张景光, 马凤云, 李新荣. 干旱区土地退化与荒漠化对土壤碳循环的影响. 中国沙漠, 2002, 22(6): 525-533.

[59] 耿元波, 罗光强, 袁国富, 李明峰, 孟维奇, 董云社. 农垦及放牧对温带半干旱草原土壤碳素的影响. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2518-2523.

[60] 曹裕松, 李志安, 江远清, 丁思统. 陆地生态系统土壤呼吸研究进展. 江西农业大学学报, 2004, 26(1): 138-143.

[61] 刘亮. 基于 LCA 模型的工程项目碳足迹评估实证研究. 赣州: 江西理工大学, 2011.

[62] Huang Y, Sun W J, Zhang W, Yu Y Q. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 766-775.

[63] 胡秀莲, 李俊峰. 关于建立我国清洁发展机制(CDM)项目运行管理机制的几点建议(一). 中国能源, 2001, (8): 6-9.

[64] 孙慧丽. 清洁发展机制下我国碳排放市场研究. 南京: 南京林业大学, 2012.